Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 15, No. 1, Spring 2023, p. 169-189

Parameterization and Evaluation of a Simple Simulation Model (SSM-iCrop2) for Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Growth and Yield in Iran

Shabnam Pourshirazi[1], Afshin Soltani[2*], Ebrahim Zeinali[3] and Benjamin Torabi[3]

Received: 16-05-2021
Revised: 04-08-2021
Accepted: 16-08-2021
Available Online: 16-08-2021

How to cite this article:
Pourshirazi, S., Soltani, A., Zeinali, E., & Torabi, B. (2023). Parameterization and Evaluation of a Simple Simulation Model (SSM-iCrop2) for alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth and yield in Iran. *Journal of Agroecology*. *15*(1), 191-211.
DOI: 10.22067/agry.2021.70433.1044

Introduction

Crop simulation models are very useful tools for the evaluation of plant growth and development processes. Crop-simulating models may be used to estimate yield and evaluate climatic, plant, and management parameters on yield. Also, it may be used to predict crop water requirements under different conditions. Crop models should be evaluated and parameterized to simulate crop growth and development. Parameterization is used for precise simulation of crop growth and development and can estimate the best and most appropriate values for model parameters obtained via observed data or calibration. The objectives of this study were to describe the SSM-iCrop2 model, determine plant parameters, and evaluate alfalfa (*Medicago sativa* L.) in its major production regions using the SSM-iCrop2 model in Iran.

Materials and Methods

SSM-iCrop2 crop simulation model is a simplified form of SSM crop models which is suitable for the simulation of growth, development, and yield of different crops under different environmental conditions and large-scale estimation of crop production, especially in the evaluation of nutrient availability and climatic effects. This model includes sub-models of phenology, leaf expansion and senescence, dry matter production and distribution, and soil water balance. Daily weather data, agronomic management, soil properties, and plant parameters are required for simulation in this model. The present study investigates the performance of the SSM-iCrop2 model regarding the prediction of single cuts and overall cuts, phonologic stages, and water requirement of alfalfa under changing climatic conditions in Iran. To simulate the growth, development and yield of alfalfa using SSM-iCrop2 model in Iran, the major irrigated alfalfa production provinces, including East Azarbaijan, Hamedan, West Azarbaijan, Sistan and Baluchestan, Khorasan Razavi, Esfahan, Kordestan, Ghazvin, Ardabil, Markazi, Fars, Zanjan, Chaharmahal and Bakhtiyari and Tehran were identified based on the data available in Ministry of Agriculture statistics. Then, field experiment data required for model parameterization and estimation were collected from these provinces.

Results and Discussion

According to the results of the SSM-iCrop2 model parameterization, two cultivars with different leaf area indices (high-yielding and low-yielding) were identified in major alfalfa production provinces. The model was evaluated using independent experimental data that had not been used for parameterization. The evaluation results for alfalfa yield showed that the observed single-cut forage yield ranged from 112 to 640 g.m-2 with an average of

1- Ph.D. Graduate, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2- Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3- Associate Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
(*- Corresponding author's Email: Afshin.Soltani@gmail.com)

330 g.m-2; the observed total annual forage yield ranged from 646 to 4042 g.m-2 with an average of 1717 g.m-2; and the water requirement of alfalfa obtained from the NETWAT software was between 5140 to 12690 m3 ha-1 with an average of 8746 m3 ha-1. The predicted single-cut forage yield, predicted total annual forage yield, and alfalfa water requirement ranged from 189 to 457 g.m-2 with an average of 351 g.m-2, 693 to 3296 g.m-2 with an average of 1654 g.m-2, and 4093 to 16874 m3 ha-1 with an average of 10940 m3.ha-1, respectively. Overall, in the evaluation of observed versus simulated alfalfa forage yield, 31 points were obtained for single-cut yield with a correlation coefficient (r) of 0.79, root mean square error (RMSE) of 88.3 g.m-2, and coefficient of variation (CV) of 26.78%; and 21 points were obtained for annual yield with an r of 0.90, RMSE of 344.4 g.m-2, and CV of 20.05%. The evaluation results also showed that the observed versus simulated alfalfa water requirement had an r of 0.43, RMSE of 3503 m3 ha-1, and CV of 40%.

Conclusion

The results obtained from parameterization and evaluation of the SSM-iCrop2 model show that the mentioned model presents a logical prediction and accurate estimation of model parameters for yield and water requirement of alfalfa crops in Iran. Thus, this model may be used for the prediction of alfalfa yield under different climates and management conditions.

Keywords: Crop models, Forage, Phenology, Water requirement

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱٤۰۲، ص ۱۸۹-۱٦۹

پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد یونجه (*Medicago sativa* L.) در ایران

شبنم پورشیرازی[۱]، افشین سلطانی[۲*]، ابراهیم زینلی[۳] و بنیامین ترابی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۱

چکیده

برای اطمینان از مدل‌های شبیه‌سازی زراعی می‌توان پارامتریابی و ارزیابی محصول را با مجموعه‌ای از داده‌های مناسب از محیط، مدیریت، ارقام و خاک‌های متفاوت انجام داد. بنابراین، هدف از این مطالعه، تعیین پارامترهای گیاهی و ارزیابی عملکرد علوفه یونجه (*Medicago sativa* L.) با استفاده از مدل SSM-iCrop2 در مناطق عمده تولید آن در ایران بود. این مطالعه عملکرد مدل را از نظر پیش‌بینی عملکرد تک چین و مجموع سالانه، مرحله فنولوژیک و نیاز آبی یونجه بررسی می‌کند. ارزیابی مدل بر اساس داده‌های آزمایشی مستقل از مرحله پارامتریابی انجام شد. مجموع عملکرد علوفه سالانه مشاهده شده بین ۶۴۶ تا ۴۰۴۲ با میانگین ۱۷۱۷ گرم در مترمربع و نیاز آبی یونجه حاصل از برنامه NETWAT بین ۵۱۴۰ تا ۱۲۶۹۰ با میانگین ۸۷۴۶ مترمکعب در هکتار بود. عملکرد شبیه‌سازی شده و نیاز آبی یونجه به‌ترتیب بین ۶۹۳ تا ۳۲۹۶ با میانگین ۱۶۵۴ گرم در مترمربع و ۴۰۹۳ تا ۱۶۸۷۴ با میانگین ۱۰۹۴۰ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد. همچنین، نتایج ارزیابی نشان داد که ضریب همبستگی (r)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV) برای عملکرد تک چین شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهده شده به‌ترتیب ۰/۷۹، ۸۸/۳ گرم در مترمربع و ۲۶/۷۸ درصد، برای عملکرد علوفه سالانه به‌ترتیب ۰/۹۰، ۳۴۴/۴ گرم در مترمربع، ۲۰/۰۵ درصد و برای نیاز آبی یونجه به‌ترتیب ۰/۴۳، ۳۵۰۳ مترمکعب در هکتار و ۴۰ درصد به‌دست آمد. نتایج نشان داد که برآوردها برای متغیرهای مختلف قابل قبول است؛ بنابراین، می‌توان از این مدل برای تخمین عملکرد پتانسیل، خلأ عملکرد و اثرات تغییرات اقلیمی محصول یونجه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های گیاهان زراعی، علوفه، نیاز آبی، فنولوژی

۱- فارغ‌التحصیل دکتری اگرواکولوژی، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
۲- استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
۳- دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email: Afshin.Soltani@gmail.com)

DOI: 10.22067/agry.2021.70433.1044

مقدمه

یونجه (*Medicago sativa* L.) یکی از گیاهان علوفه‌ای چندساله مهم در ایران و جهان است که به‌دلیل داشتن علوفه‌ای با کیفیت بالا، منبع غذایی مهمی برای انواع دام‌ها می‌باشد و به‌تنهایی می‌تواند انرژی، پروتئین، مواد معدنی و ویتامین‌های مورد نیاز آن‌ها را تأمین کند (Monirifar et al., 2020; Monirifar et al., 2020). تولید سالانه این محصول علوفه‌ای طی ۱۵ سال گذشته (۱۳۹۶-۱۳۸۲) در کشور به‌طور میانگین تقریباً پنج میلیون تن علوفه خشک (با رطوبت ۱۵ درصد) با سطح زیر کشت متوسط ۶۰۰ هزار هکتار معادل ۵/۴۱ درصد از کل اراضی قابل‌کشت ایران (که به‌ترتیب ۹۰ و ۱۰ درصد آن تحت شرایط آبیاری و دیم کشت می‌شود) بود (Agricultural Statistics, 2020; Ghaderpour et al., 2018 ;). حبوبات علوفه‌ای در ایران بیش از ۱۰۰ درصد ضریب خودکفایی را دارند و بیش از نیاز یا تقاضای کشور تولید می‌شوند (Soltani et al., 2020) و برای اطمینان از این خودکفایی، باید از میزان تولید محصولات علوفه‌ای در آینده اطمینان حاصل کرد.

افزایش دما و کاهش بارندگی باعث تغییرات آب‌وهوایی در کشور شده است و منجر به آسیب‌پذیری بیشتر اکوسیستم‌های کشاورزی در ایران می‌شود (Vatankhah et al., Aliahmadi et al., 2021 ; 2020) و به همین دلیل، بخش اعظم کشور به‌طور منظم دچار خشکسالی و کاهش منابع آب آبیاری هستند و از آنجایی که یونجه نسبت به گونه‌های زراعی دیگر تحمل به خشکی بیشتری و ارقام مختلف آن سازگاری بالایی به شرایط سخت و متفاوت اقلیمی دارند، از این جهت انتخاب ارقامی مناسب با ویژگی هر منطقه یکی از مهم‌ترین فاکتورهای افزایش عملکرد این محصول می‌باشد (Monirifar et al., 2020). یونجه در طول دوره رشد خود آب زیادی مصرف می‌کند و باران ناکافی در کشور یکی از محدودیت‌های اصلی تولید یونجه می‌باشد، بنابراین، اتخاذ روش‌های آبیاری درست می‌تواند یکی از روش‌های صرفه‌جویی آب برای این محصول باشد (Monirifar et al., 2020). از این جهت شناخت میزان سازگاری و مقدار تولید این محصول در مناطق مختلف آب‌وهوایی ایران یکی از الزامات تولید عملکرد با بالاترین پتانسیل ممکن در آن منطقه می‌باشد.

به‌منظور بررسی میزان پاسخ عملکرد به شرایط مختلف محیطی، می‌توان از آزمایش‌های مزرعه‌ای در طی چند سال و در مکان‌های مختلف استفاده کرد، امّا چنین کاری سخت، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد. امّا امروزه مدل‌های شبیه‌سازی ابزار مفیدی برای مطالعه بوده که می‌تواند از انجام چنین آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه جلوگیری کند (Dadrasi et al., 2020; Soltani & Hoogenboom, 2007). مدل‌های ریاضی، مجموعه‌ای از معادلات هستند که می‌توانند فرآیندهای رشد گیاه را به‌صورت کمّی بررسی و توصیف کنند (Torabi et al., 2020).

از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان برای تخمین میزان عملکرد و ارزیابی پارامترهای اقلیمی، گیاهی و مدیریتی بر روی عملکرد و همچنین برآورد نیاز آبی محصولات در شرایط مختلف استفاده کرد. به‌منظور شبیه‌سازی رشد و نمو محصولات، مدل‌های زراعی باید مورد پارامتریابی و ارزیابی قرار گیرند. پارامتریابی برای شبیه‌سازی دقیق رشد و نمو محصولات انجام می‌شود که می‌تواند بهترین و مناسب‌ترین مقدار پارامترهای مدل که بر اساس داده‌های مشاهده شده و یا کالیبراسیون به‌دست آمده است را برآورد کند (Dadrasi et al., 2020).

SSM به گروهی از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی اطلاق می‌شود که ساخت آن‌ها به سال ۱۹۸۶ برمی‌گردد که یک مدل شبیه‌سازی ساده برای سویا (*Glycine max* L.) تهیه شد (Sinclair, 1986). ساختار این مدل طی ۳۰ سال بعد بهبود یافت و تقریباً برای همه گیاهان زراعی استفاده شده است که از جمله می‌توان به ذرت (*Zea mays* L.) (Sinclair & Muchow, 1995)، سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) (Sinclairet et al., 1997)، گندم (*Triticum aestivum L.*) (Soltani et al., Sinclair & Amir, 1992 ; 2013)، جو (*Hordeum vulgare* L.) (Wahbi & Sinclair, 2005)، بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L.) (Hammer et al., 1995) و نخود (*Cicer arietinum* L.) (Soltani et al., 1999) اشاره کرد. در برخی منابع توضیحات کامل مدل‌های SSM ارائه شده است (Soltani et al., 2013; Soltani & Sinclair, 2012).

SSM-iCrop2 نسخه ساده‌تری از مدل‌های محصول SSM است که برای انجام برآورد در مقیاس وسیع تولید محصولات مختلف گیاهان زراعی، به‌ویژه در ارزیابی در دسترس‌بودن مواد غذایی و تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی مناسب است. این مدل برای شبیه‌سازی

تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی از جمله گونه‌های باغی و علوفه‌های چندساله اقتباس شده است.

تاکنون مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی رشد و نمو محصولات زراعی استفاده شده است که می‌توان از مدل‌هایی مانند DSSAT (Jones et al., 2003)، CropSyst (Stöckle, 2003) و APSIM (McCown, 1996) نام برد. مدل SSM-iCrop2 در مقایسه با مدل‌های دیگر دارای مزایای قابل‌توجهی می‌باشد، به‌عنوان مثال به‌عنوان مدلی با منبع باز برای ورودی‌های مورد نیاز است و از صفحه گسترده اکسل آن برای تهیه ورودی و تولید خروجی استفاده می‌شود. در تحقیقی که با استفاده از مدل‌های SSM-iCrop2، CropSyst، APSIM و DSSAT برای پیش‌بینی عملکرد گندم انجام شد، نتایج مشخص نمود که مدل SSM-iCrop2 دقت بیشتری در پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم داشته است و همچنین بیان شد که تعداد پارامترهای ورودی آن با ۵۵ پارامتر از دو مدل APSIM با ۲۹۲ و DSSAT با ۲۱۱ پارامتر بسیار کمتر است (Soltani & Sinclair, 2015).

بنابراین، هدف از این مطالعه انطباق، پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی محصول یونجه بر اساس داده‌های آزمایشی میدانی مستقل به‌دست آمده در استان‌های عمده تولیدکننده یونجه در ایران بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد یونجه با مدل SSM-iCrop2 در کشور، ابتدا بر اساس اطلاعات موجود در آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی، استان‌های مهم تولیدکننده علوفه یونجه آبی که شامل استان‌های آذربایجان‌شرقی، همدان، آذربایجان‌غربی، کرمان، سیستان و بلوچستان، خراسان‌رضوی، اصفهان، کردستان، قزوین، اردبیل، مرکزی، فارس، زنجان، چهارمحال و بختیاری و تهران شناسایی شدند و سپس داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مورد نیاز برای پارامتریابی و ارزیابی از این استان‌های مهم جمع‌آوری شدند.

جدول ۱- ورودی‌های داده‌های هواشناسی و مدیریت زراعی مورد نیاز برای اجرای مدل SSM-iCrop2
Table 1- Required weather, soil and crop management input to run SSM-iCrop2

ورودی‌ها Inputs	مخفف Abbreviation	واحد Unit
داده‌های هواشناسی Weather data		
حداکثر دمای روزانه Maximum daily temperature (TMAX)	TMAX	درجه سانتی‌گراد °C
حداقل دمای روزانه Minimum daily temperature (TMIN)	TMIN	درجه سانتی‌گراد °C
تشعشع خورشیدی روزانه Solar radiation	SRAD	مگاژول در مترمربع در روز MJ $m^{-2}d^{-1}$
بارندگی روزانه Daily rainfall	RAIN	میلی‌متر mm
مدیریت زراعی Crop management		
تاریخ کاشت Planting data	PDOY	روز day
سطح آستانه آبیاری Irrigation threshold level	IRGLVL	میلی‌متر mm
تعداد برداشت یا چین Clipping (harvest) number for forages	ClipNo	-

جدول ۲- مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک در مناطق تولیدکننده یونجه بر اساس IFPRI Harvest Choice

Table 2- Soils physiochemical profile in alfalfa production areas based on IFPRI Harvest Choice (Koo & Dimes 2013)

کد خاک Soil code	کربن آلی خاک Soc (%)	عمق خاک SOLDEP (mm)	آلبیدوی خاک SALB	شماره منحنی خاک CN	زهکشی خاک DRAINF	مقدار آب در زمان اشباع SAT (m)	حد ظرفیت زراعی DUL (m)	مقدار آب در حد پژمردگی LL (m)
HC2-Clay HF120	>1.2	1200	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233
HC5-Clay MF120	0.7-1.2	1200	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233
HC8-Clay LF120	0-0.7	1200	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233
HC12-Loam HF060	>1.2	600	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180
HC14-Loam MF120	0.7-1.2	1200	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180
HC17-Loam LF120	0-0.7	1200	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180

کد خاک: ۲: رسی، حاصلخیزی بالا، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر، کد خاک ۵: رسی، حاصلخیزی متوسط، عمق خاک ۱۲۰ سانتی‌متر، کد خاک ۱۲: لومی، حاصلخیزی بالا، عمق خاک ۶۰ سانتی‌متر، کد خاک ۱۴: لومی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر، کد خاک ۱۷: لومی، حاصلخیزی کم، عمق خاک ۱۲۰ سانتی‌متر.

Soil codes (IFPRI Harvest Choice): 2= Clay, high fertility, 120 cm depth; 5= Clay, medium fertility, 120 cm depth; 8= Clay, low fertility, 120 cm depth; 12= Loam, high fertility, 60 cm depth; 14= Loam, medium fertility120cm depth; 17= Loam, low fertility 120 cm depth.

توصیف مدل: مدل SSM-iCrop2 یک مدل شبیه‌سازی گیاه زراعی و نسخه ساده‌تری از مدل‌های محصول SSM است که برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد محصولات مختلف در شرایط مختلف محیطی و انجام برآورد در مقیاس وسیع تولید محصولات مختلف گیاهان زراعی، به‌ویژه در ارزیابی در دسترس‌بودن مواد غذایی و تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی مناسب است و شامل مدل‌های فرعی فنولوژی، گسترش و پیری سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب خاک می‌باشد (برای دریافت مدل و فایل‌های راهنمای آن به سایت /http://ssm-crop-models.net مراجعه کنید). برای انجام شبیه‌سازی این مدل، داده‌های روزانه آب‌وهوا (جدول ۱)، مدیریت زراعی (جدول ۱) و مشخصات خاک (جدول ۲) مورد نیاز است (Soltani et al., 2020).

فنولوژی: فنولوژی بر اساس مفهوم واحد دمایی تعدیل شده (TU) بر اساس مقدار رطوبت خاک پیش‌بینی می‌شود. به‌منظور تعیین تاریخ باز شدن جوانه‌ها و شروع رشد مجدد بهاره در علوفه‌های چندساله مانند یونجه، فرض بر این بود که باز شدن جوانه‌ها یا شروع رشد مجدد بهاره هنگامی رخ دهد که واحد دمایی تجمعی از اول ژانویه به بعد به یک مقدار بحرانی برسند و یا از آن عبور (Soltani et al., 2020). مقدار واحد دمایی روزانه (DTU) و تجمعی (CTU) با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

معادله (۱) $$DTU = (T_{01} - T_b) \times tempfun$$

معادله (۲) $$CTU = \Sigma\, DTU$$

که در آن، tempfun: همان منحنی واکنش سرعت نمو به دما یا تابع دمایی است که مقدار آن از معادله‌های زیر محاسبه می‌شود (Soltani et al., 2006):

معادله (۳)

$$\begin{aligned}
&tempfun = 0 && if\ \ TMP \le TBD\\
&tempfun = (TMP - TBD)/(TP1D\text{-}TBD) && if\ \ TBD<TMP<TP1D\\
&tempfun = 1 && if\ \ TP1D \le TMP \le TP2D\\
&tempfun = (TCD - TMP)/(TCD\text{-}TP2D) && If\ \ TP2D<TMP<TCD\\
&tempfun = 0 && if\ \ TMP \ge TCD
\end{aligned}$$

که در معادلات فوق، TMP: میانگین دمای شبانه‌روز، TBD: دمای پایه، TP1D: دمای تحتانی مطلوب، TP2D: دمای فوقانی مطلوب، TCD: دمای سقف، tempfun: سرعت نمو نسبی و CTU: واحد دمایی تجمعی برحسب درجه سانتی‌گراد برای گیاه می‌باشند. گیاهان برای رسیدن به هر یک از مراحل نموی (سبز شدن، شروع رشد برگ، پایان رشد برگ، شروع گل‌دهی، پایان گل‌دهی، غلاف‌دهی، شروع پر شدن دانه، شروع رسیدگی و رسیدگی کامل) نیاز به مقادیر مشخصی از واحد دمایی تجمعی دارند که این مقادیر به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل SSM-iCrop2 جهت مدل‌سازی مراحل فنولوژیک گیاهان محسوب می‌شوند.

تغییرات شاخص سطح برگ: روش‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی تغییرات شاخص سطح برگ (هر مترمربع یا هکتار سطح برگ در هر مترمربع یا هکتار زمین) در شرایط مختلف وجود دارد. شاخص سطح برگ در هر روز در مدل SSM-iCrop2 با معادله زیر محاسبه می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012):

معادله (۴) $$LAI_i = LAI_{i-1} + GLAI_i - DLAI_i$$

که در آن، LAI_i: مقدار شاخص سطح برگ در روز حاضر، LAI_{i-1}: مقدار شاخص سطح برگ در روز قبل، $GLAI_i$: مقدار افزایش در LAI در روز حاضر و $DLAI_i$: مقدار کاهش در LAI در روز حاضر

هستند. واحد همگی مترمربع بر مترمربع است.

میزان گسترش در LAI در هر روز در طول دوره گسترش سطح برگ یعنی از شروع شبیه‌سازی گیاه تا مرحله نموی که پیر شدن برگ‌ها شروع می‌شود (BLS) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

معادله (۵) $GLAI_i = (LAI_i - LAI_{i-1}) \times WSFL$

که در آن، WSFL: ضریب اصلاحی گسترش سطح برگ برای تنش آب (کمبود یا زیادبود آب) می‌باشد که مقدار آن بین صفر (در شرایط تنش) تا یک (در شرایط بدون تنش) متغیر است. مقدار LAI_i با کمک یک تابع نمایی به مرحله نموی نرمالیزه شده (NDS) و در حقیقت به واحد دمایی که گیاه تجربه کرده است، مرتبط می‌شود:

معادله (۶) $LAI_i = NDS/[NDS + \exp(AL - BL \times NDS)] \times LAIMX$

که در آن، AL و BL: ضرایب ثابت و پارامتر ورودی مدل هستند و LAIMX: حداکثر شاخص سطح برگ مورد انتظار و پارامتر ورودی دیگری در مدل است.

در صورتی‌که پارامترهای AL و BL در دست نباشد، با در دست داشتن دو نقطه از رابطه LAI در مقابل NDS ، مقدار آن‌ها توسط مدل به‌صورت داخلی محاسبه می‌گردد. چنانچه این دو نقطه را با مشخصات (y_1 ،x_1) و (y_2 ،x_2) نشان دهیم، AL و BL با حل تحلیلی معادله ۶ به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

معادله (۷) $BL = \log((1/y_2-1) / (1/x_2)) - \log((1/y_1-1) / (1/x_1)) / x_1 - x_2$

معادله (۸) $AL = \log((1/y_1) / (1/x_1)) + BLx_1$

به‌عنوان مثال، در این پژوهش بر اساس آزمایشات به‌دست آمده از سایر تحقیقات (جدول ۲)، به‌ترتیب دو نقطه با مشخصات (۰/۰۱، ۰/۱۵) و (۰/۹۵، ۰/۸) هستند، مفهوم آن به این صورت قابل توضیح است که وقتی گیاه ۱۵ درصد از دوره حیاتی خود را طی می‌کند، LAI آن به یک دهم درصد حداکثر قابل انتظار (LAIMX) می‌رسد و وقتی که گیاه هشت درصد از دوره حیاتی خود را طی می‌کند، LAI آن به ۹۵ درصد حداکثر قابل انتظار، افزایش می‌یابد.

بعد از مرحله BLS یعنی شروع پیر شدن برگ‌ها، شبیه‌سازی میزان کاهش روزانه در LAI (DLAI) با روش ساده‌ای صورت می‌گیرد. در این روش LAI از مقداری که در BLS دارد (BLSLAI) شروع به کاهش می‌کند و در رسیدگی برداشت (HAR) به صفر می‌رسد (در علوفه یونجه، مرحله کاهش DLAI در نظر گرفته نمی‌شود، زیرا علوفه در آغاز گل‌دهی برداشت می‌شود). مقدار DLAI و LAI در هر روز از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

معادله (۹) $DLAI = (LAI_{i-1} - LAI_i) \times WSFDS$

معادله (۱۰) $LAI_i = BLSLAI \times (1 - NDS) / (1 - frBLS)^{SRATE}$

که در معادلات فوق، WSFDS: ضریب اصلاحی تنش خشکی برای تسریع نمو فنولوژیک و پیر شدن برگ‌ها است که در قسمت کمی‌سازی واکنش به تنش آب توضیح داده شده است. frBLS: مرحله نمو نرمالیزه شده است که در آن پیر شدن و کاهش سطح برگ آغاز می‌گردد و SRATE: یک ضریب است که نحوه کاهش LAI از BLS تا HAR را مشخص می‌کند.

تولید و توزیع ماده خشک: هسته اصلی مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، محاسبه تولید ماده خشک است که در آن انرژی خورشیدی به انرژی نهفته در پیوندهای شیمیایی ماده خشک تولیدی تبدیل می‌شود. مبنای محاسبه تولید ماده خشک بر اساس دریافت و تبدیل تشعشع خورشیدی را توضیح داده شده است (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani, 2009). در مدل حاضر نیز از همین مبنا استفاده می‌شود. برای محاسبه تولید ماده خشک روزانه (DDMP، گردم در مترمربع زمین در روز)، ابتدا کسری از تشعشع خورشیدی که در همان روز دریافت می‌شود (FINT) محاسبه می‌گردد و سپس بر اساس مفهوم کارایی استفاده از تشعشع (RUE)، گرم ماده خشک تولیدی به‌ازای هر مگاژول تشعشع فعال فتوسنتزی دریافت شده)، ماده خشک تولیدی محاسبه می‌شود:

معادله (۱۱) $FINT = 1 - \exp(-KPAR \times LAI)$

معادله (۱۲) $DDMP = SRAD \times 0.48 \times FINT \times RUE$

که در معادلات فوق، KPAR: ضریب خاموشی پوشش گیاهی برای تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) می‌باشد، SRAD (مگاژول در مترمربع در روز): تشعشع خورشیدی رسیده به زمین در روز مورد نظر، ۰/۴۸ مقدار SRAD را به PAR تبدیل می‌کند و بدین معنی است که ۴۸ درصد تشعشع خورشیدی از PAR تشکیل شده است؛ و RUE: درواقع شیب خط ماده خشک تولیدی در مقابل PAR دریافت شده است که مقدار روزانه RUE به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Soltani et al., 2013):

معادله (۱۳) $RUE = IRUE \times TCFRUE \times WSFG$

که در آن، IRUE: کارایی استفاده از تشعشع فعال فتوسنتزی در شرایط مطلوب، TCFRUE: ضریب اصلاحی RUE برای دما و

WSFG: ضریب اصلاحی RUE برای تنش آب هستند و مقدار آن‌ها برحسب شرایط دمای هوا و آب خاک بین صفر (تنش کامل) و یک (بدون تنش) متغیر است.

فاکتور تصحیح RUE برای دما (TCFRUE) در مدل با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

معادله (۱۴)

TCFRUE=0	*if TMP≤TBRUE*
TCFRUE=(TMP-TBRUE)/(TP1RUE-TBRUE)	*if TBRUE<TMP<TP1RUE*
TCFRUE=1	*if TP1RUE≤TMP≤TP2RUE*
TCFRUE=(TCRUE-TMP)/(TCRUE-TP2RUE)	*if TP2RUE<TMP<TCRUE*
TCFRUE=0	*if TMP≥TCRUE*

که در آن، مقدار TCFRUE بین صفر تا یک متغیر است. TBRUE، TP1RUE، TP2RUE، TCRUE: دماهای کاردینال (به‌ترتیب دمای پایه، دمای مطلوب تحتانی، دمای مطلوب فوقانی و دمای سقف) برای RUE می‌باشند و همگی برحسب درجه سانتی‌گراد هستند.

موازنه آب خاک: مدل حاضر موازنه آب خاک در مزرعه یا باغات و اثرات تنش آبی (کمبود و یا زیادی) را شبیه‌سازی می‌کند (Soltani & Sinclair, 2012; Ritchie, 1998Sinclair, 1986;). برای انجام محاسبات موازنه آب خاک، خاک به‌صورت دو لایه درنظرگرفته شده است. این دو لایه عبارتند از: یک لایه فوقانی با ضخامت ۱۵ تا ۶۰ سانتی‌متر و یک لایه دوم که خود شامل لایه اول نیز می‌باشد و برابر با عمق مؤثر استخراج آب[1] توسط گیاه است؛ بنابراین، عمق لایه دوم در ابتدا برابر با عمق اولیه ریشه در شروع شبیه‌سازی گیاه (کاشت، شروع مجدد در رشد بهاره یا باز شدن جوانه) است که با رشد ریشه افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد.

در هر روز معین (i) مقدار آب قابل دسترس در لایه اول (ATSW1، میلی‌متر) و لایه دوم (ATSW) با معادلات زیر محاسبه می‌شود:

معادله (۱۵)

$$ATSW_i = ATSW_{i-1} + RAIN + IRGW - DRAIN1 - RUNOF - SEVP - TR1$$

معادله (۱۶)

$$ATSW_i = ATSW_{i-1} + RAIN + IRGW + EWAT - DRAIN1 - RUNOF - SEVP - TR$$

که در آن، RAIN: بارندگی روزانه، IRGW: آبیاری انجام شده، DRAIN1: زه‌کشی از لایه اول، RUNOF: رواناب، SEVP: تبخیر از سطح خاک، TR1: مقدار تعرق از گیاه که لایه اول استخراج شده است، EWAT: مقدار آبی که در اثر افزایش عمق مؤثر استخراج آب یعنی نفوذ ریشه به لایه‌های زیرین، قابل دسترس شده است و DRAIN: زه‌کشی از لایه دوم هستند. همگی این اجزا دارای واحد میلی‌متر و در مقیاس روزانه می‌باشند.

رشد ریشه و عمق آن: برای لایه مؤثر ریشه یا همان عمق مؤثر استخراج آب، کل آب قابل دسترس خاک (TTSW)، کل آب خاک (WATRL)، آب خاک در حالت اشباع (WSATRL) و کسر آب قابل دسترس خاک (FTSW) که همگی برحسب میلی‌متر هستند با معادلات زیر محاسبه می‌گردد (Soltani & Sinclair, 2012):

معادله (۱۷) $$TTSW = DEPORT \times EXTR$$

معادله (۱۸) $$WATRL = DEPORT \times CLL + ATSW$$

معادله (۱۹) $$WSATRL = DEPORT \times SAT$$

معادله (۲۰) $$FTSW = ATSW / TTSW$$

که در آن، DEPORT: عمق لایه مؤثر ریشه (میلی‌متر) است، EXTR: کسر حجمی آب خاک قابل دسترس (تفاضل حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم)، CLL: رطوبت خاک در حد نقطه پژمردگی دائم و SAT: رطوبت خاک در نقطه اشباع هستند و واحد آن‌ها متر بر متر یا مترمکعب بر مترمکعب می‌باشند. FTSW: شاخص وضعیت رطوبتی خاک در لایه مؤثر ریشه که مقدار آن در CLL برابر صفر، در ظرفیت زراعی برابر یک و در بالاتر از آن، بیشتر از یک است.

تبخیر از خاک: بدین منظور ابتدا تبخیر تعرق بالقوه (PET)، سپس تبخیر بالقوه از سطح خاک (EOS) و سرانجام تبخیر واقعی از سطح خاک (SEVP) و همگی برحسب میلی‌متر در روز محاسبه می‌شوند.

تبخیر تعرق بالقوه با روش پرستلی و تیلور اصلاح شده توسط ریچی محاسبه می‌شود (Priestley & TAYLOR, 1972; Ritchie, 1998). در این روش، ابتدا تبخیر و تعرق معادل (EEQ) از آلبیدو (ALBEDO) سطح (خاک و گیاه زراعی)، میانگین دمای هوا در طی روز (TD) و تشعشع خورشیدی روزانه (SRAD) به‌دست آید:

معادله (۲۱)

$$EEQ = SRAD \times (0.004876 - 0.004374 \times ALBEDO) \times (TD + 29)$$

1-Effective extraction depth

میانگین دمای هوا از معادله زیر محاسبه می‌شود که در آن وزن بیشتری به حداکثر دمای روزانه داده شده است:

معادله (۲۲)
$$TD = 0.6 \times TMAX + 0.4 \times TMIN$$

آلبیدو سطح بستگی به بخشی از سطح مزرعه که توسط گیاه زراعی یا خاک پوشیده شده دارد و به آلبیدو گیاه زراعی (CALB) یا خاک (SALB) نیز وابسته است:

معادله (۲۳)
$$ALBEDO = CALB \times (1 - \exp(-KET \times ETLAI)) + SALB \times (\exp(-KET \times ETLAI))$$

بعد از تخمین EEQ، تبخیر تعرق بالقوه بسته به شرایط طی روز به‌دست می‌آید:

معادله (۲۴)
$$PET=EEQ\times1.1 \quad if \quad 5\leq TMAX\leq34$$
$$PET=EEQ((TMAX-34) \times 0.05 + 1.1) \quad if \quad TMAX>34$$
$$PET=EEQ\times0.01\times EXP(0.18\times(TMAX+20)) \quad if \quad TMAX<5$$

که در آن، TMAX: حداکثر دمای روزانه می‌باشد.

تبخیر بالقوه از سطح خاک یعنی تبخیر از خاک کاملاً مرطوب، با ضرب PET در کسری از سطح خاک که توسط گیاه پوشیده نشده است به‌دست می‌آید:

معادله (۲۵)
$$EOS = PET \times EXP(-KET \times ETLAI)$$

که در آن، عبارت نمایی در سمت راست معادله، کسری از زمین که لخت است را نشان می‌دهد، KET: ضریب خاموشی برای کل تشعشع خورشیدی (و نه PAR) (معادل ۰/۵) و ETLAI: شاخص سطح برگ مؤثر در تبخیر هستند.

تبخیر حقیقی از سطح خاک (SEVP) بر مبنای مدل ساده شده دو مرحله‌ای تبخیر است (Soltani & Sinclair, 2012). در مرحله اول، تبخیر از سطح خاک توسط انرژی قابل دسترس محدود می‌شود و زمانی اتفاق می‌افتد که لایه اول خاک مرطوب باشد، یعنی اولین روز پس از مرطوب شدن سطح خاک با بارندگی یا آبیاری بیش از ۱۰ میلی‌متر. در این شرایط مقدار SEVP مساوی با EOS قرار داده می‌شود. مرحله دوم، در زمانی اتفاق می‌افتد که لایه اول خشک باشد و یا از مرطوب شدن سطح خاک بیش از یک روز گذشته باشد، یا کسر آب قابل دسترس در لایه مؤثر ریشه کمتر از نیم باشد. در این مرحله، هر چه زمان پیشرفت کند، تبخیر حقیقی از سطح خاک کمتر می‌شود. معادله زیر مراحل تبخیر از سطح خاک را نشان می‌دهد:

معادله (۲۶)
$$SEVP=EOS \quad Stage\ I$$
$$SEVP=EOS \times [(DYSE + 1)^{0.5} - DYSE^{0.5}] \quad Stage\ II$$

که در آن، DYSE: تعداد روز از شروع مرحله دوم است.

تعرق از گیاه: تعرق روزانه از گیاه (TR، میلی‌متر در روز) بر اساس پیوستگی بین تعرق و تولید ماده خشک روزانه (DDMP) محاسبه می‌شود (Tanner & Sinclair, 1983). بر این اساس، مقدار تعرق روزانه متناسب با مقدار ماده خشک روزانه (حاصل فتوسنتز که از طریق روزنه‌ها رخ می‌دهد یعنی همان مسیری که تعرق از آن روی می‌دهد) است که درجه خشکی هوا (VPD، کمبود فشار بخار اشباع برحسب کیلو پاسکال) و ویژگی‌های گیاه از طریق ضریب کارایی تعرق (TEC، کیلو پاسکال) نیز اثرگذار است:

معادله (۲۷)
$$TR = (DDMP \times VPD) / TEC$$

کمبود فشار بخار اشباع (VPD) به‌صورت کسری (VPDF) از اختلاف بین فشار بخار اشباع در دمای حداکثر روزانه (VPTMAX) و دمای حداقل روزانه (VPTMIN) به‌دست می‌آید:

معادله (۲۸)
$$VPD = VPDF (VPTMAX - VPTMIN)$$

که در آن، مقدار VPDF عموماً برابر ۰/۷۵ می‌باشد، ولی در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب به ۰/۶۵ قابل کاهش است.

بخشی از آب تعرق از لایه اول استخراج می‌شود. چنانچه عمق لایه مؤثر ریشه برابر یا کوچک‌تر از لایه اول باشد، همه آب تعرق از لایه اول جذب می‌شود؛ امّا چنانچه عمق لایه مؤثر ریشه بزرگ‌تر باشد، بخشی از آب تعرق از لایه اول و مابقی از لایه ریشه واقع در زیر این لایه جذب می‌گردد. در مدل این کسر (RT1) به کسر آب قابل دسترس در لایه اول (FTSW1) ارتباط داده شده است. چنانچه FTSW1 بزرگ‌تر از حد تنش برای رشد (روزنه) گیاه باشد (WSSG)، مقدار RT1 برابر یک فرض می‌شود و بدین معنی است که به‌دلیل رطوبت مناسب در این لایه، همه آب تعرق از آن لایه جذب شده است. با خشک‌تر شدن لایه اول و کاهش FTSW1 به کمتر از WSSG، مقدار این کسر (RT1) از یک رو به کاهش می‌گذارد و در FTSW1 برابر با صفر، به صفر می‌رسد:

معادله (۲۹)
$$RT1=1 \quad if \quad FTSW1\geq WSSG$$
$$RT1=FTSW1/WSSG \quad if \quad FTSW\leq WSSG$$

با ضرب RT1 در مقدار تعرق روزانه (TR)، مقدار آب تعرق یافته که از لایه اول جذب و استخراج شده است (TR1)، تخمین زده می‌شود.

زه‌کشی: زه‌کشی زمانی اتفاق می‌افتد که آب قابل دسترس

خاک در یک لایه (ATSW) بیشتر از کل آب قابل دسترس در آن لایه (TTSW) باشد. در این شرایط آب اضافه بر ظرفیت زراعی یا DUL در اثر نیروی ثقل از لایه خارج می‌شود (Ritchie, 1998):

معادله (۳۰)

$$DRAIN=0 \quad if \quad ATSW \le TTSW$$
$$DRAIN=(ATSW-TTSW)\times DRAINF \quad if \quad ATSW>TTSW$$

که در آن، DRAINF: ضریب زه‌کشی و ورودی خاک برای مدل است. چنانچه مقدار DRAINF معادل یک باشد، کل مازاد بر ظرفیت زراعی در یک روز از خاک خارج می‌شود، چنانچه مقدار آن مثلاً ۰/۳ باشد، در هر روز ۳۰ درصد آب مازاد بر ظرفیت زراعی از خاک خارج می‌گردد.

پارامتریابی مدل: پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده مربوط به رشد و تولید محصول یونجه از مقالات مختلف در سراسر کشور که در جدول ۳ ارائه شده است انجام شد. همچنین اطلاعات هواشناسی و خاک مورد نیاز برای مناطق انتخابی جمع‌آوری شد و اطلاعات مدیریتی منطبق بر آنچه در مقالات بیان شده بود، انتخاب شد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته از بین نشریات داخلی ۲۱۰ مقاله در خصوص محصول یونجه در استان‌های مهم تولیدکننده یافت شد که از بین این مقالات، تعداد ۸۵ مقاله دارای تاریخ شروع رشد مجدد بهاره دقیق بودند و مابقی به تاریخ مذکور نپرداخته بودند. از بین این ۸۵ مقاله نیز برخی از مقالات به تاریخ برداشت هر چین نپرداخته بودند؛ بنابراین، برخی دیگر از مقالات بدین صورت حذف گردید، از بین مقالات باقی‌مانده ۱۱ مقاله جهت پارامتریابی و ۱۰ مقاله جهت ارزیابی انتخاب شدند. علاوه‌براین اطلاعات عملکرد یونجه آبی با همکاری سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی از مراکز اصلی تولید این گیاه جمع‌آوری و برای ارزیابی مدل استفاده شد. نحوه پارامتریابی مدل بدین صورت بود که پارامتریابی برای فنولوژی، سطح برگ و تولید ماده خشک انجام گرفت که این پارامترها با استفاده از داده‌های تجربی نشان داده شده در جدول ۳ برآورد شده است. برای تعیین صحت پارامترهای برآورد شده، خروجی مدل عملکرد تک چین و مجموع عملکرد چین‌های سالانه با آزمایش‌های مستقل (جدول ۳) با استفاده از شاخص‌های آماری مقایسه شد (به بخش بعدی مراجعه کنید). اگر پارامترها نادرست باشند، پارامترها تغییر می‌کنند، به‌طوری‌که مقادیر خروجی مدل به نتایج آزمایش مستقل نزدیک می‌شوند.

ارزیابی مدل: ارزیابی مدل با استفاده از یک سری داده‌های آزمایشی مستقل که در پارامتریابی استفاده نشده بودند، انجام شد. فنولوژی (جدول ۳) و عملکرد (جدول ۳) شبیه‌سازی شده محصول یونجه با همین متغیرها از آزمایش‌های جمع‌آوری شده مقایسه شدند. در ارزیابی مقدار نیاز آبی یونجه (جدول ۴) از برنامه NETWAT به‌عنوان داده‌های مشاهده شده استفاده شد (که این داده‌ها هم به‌صورت برآورد می‌باشد). روش محاسبه نیاز آبی در این برنامه بدین صورت است که، برنامه ابتدا تبخیرتعرق یعنی ETo را با روش پنمن–مانتیث محاسبه می‌کند و بعد با توجه به ضریب گیاهی به تبخیرتعرق گیاه زراعی یعنی ETC و سپس به‌میزان نیاز آبیاری خالص می‌رسد.

برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی این متغیرها، مقادیر ضریب تغییرات (CV)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (r) بین مقادیر شبیه‌سازی شده و گزارش شده محاسبه شدند. همچنین، خط ۱:۱ با اختلاف ۲۰ درصد برای نشان‌دادن میزان انحراف شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده شده استفاده شد. این شاخص‌های آماری به شرح زیر محاسبه شده است:

$$RMSE = \sqrt{\Sigma(Pi-Oi)^2 / (n-1)} \quad (۳۱) \text{ معادله}$$

که در آن، P: مقادیر شبیه‌سازی شده، O: مقادیر مشاهده شده و n: تعداد نمونه می‌باشد. همچنین از تقسیم RMSE بر میانگین مقادیر گزارش شده، RMSE نسبی یا ضریب تغییرات (CV) محاسبه می‌گردد.

نتایج و بحث

در مجموع، ۳۷ پارامتر گیاهی برای پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 برای محصول یونجه استفاده شد (جدول ۵). در این مدل، تفاوت بین ارقام با کمک سه پارامتر واحد دمایی تا رسیدگی (tuHAR)، حداکثر سطح برگ مورد انتظار (LAIMX) و حداکثر شاخص برداشت (HIMAX) قابل توجیه بود. این بدان معنی است که سایر پارامترها تفاوت گونه‌ها را مشخص می‌کنند و برای تفاوت ارقام داخل یک گونه این سه پارامتر کافی هستند. از ارقام مختلف محصول یونجه با ویژگی‌های رشدی متفاوت برای پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 استفاده شد و نتیجه پارامتریابی مدل تعریف دو رقم با شاخص سطح برگ متفاوت (پر محصول و کم محصول) بود.

جدول ۳- آزمایش‌های مورد استفاده برای پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2
Table 3- Experiments used for parameterization and evaluation of SSM-iCrop2

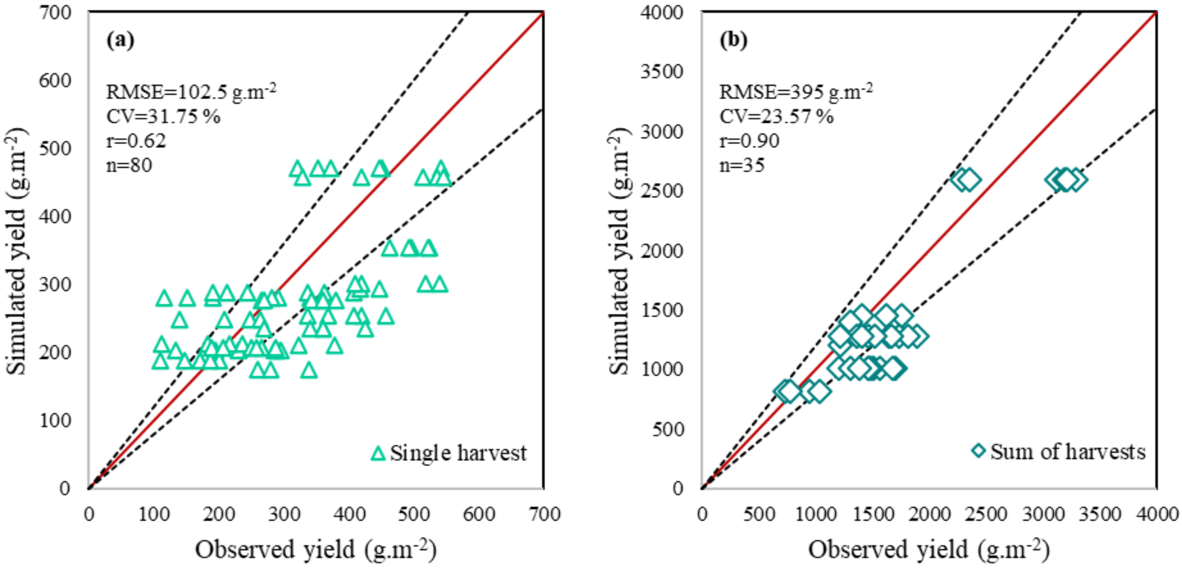
استان، مکان و سال Province, location and year	تیمارها Treatments	منابع References
	آزمایش‌های مورد استفاده در بخش پارامتریابی مدل Experiments used for model parameterization	
خوزستان، اهواز، ۱۳۹۱- ۱۳۸۹ Khuzestan, Ahvaz, 2010-2012	ژنوتیپ، فصول Genotype, seasons	Lack et al. (2016)
فارس، فسا، ۱۳۹۱- ۱۳۹۰ Fars, Fasa, 2011-2012	میزان بذر، کشت مخلوط Seed rate, intercropping	Madandust & Zahedi, (2014)
سیستان‌وبلوچستان، خاش، ۱۳۹۲- ۱۳۹۱ Sistan and Baluchestan, Khash, 2012-2013	ژنوتیپ Genotype	Moeini Zadeh et al. (2016)
خوزستان، اهواز، ۱۳۹۶ Khuzestan, Ahvaz, 2017	تاریخ برداشت، شوری Harvesting date, salinity	Nekoian far et al. (2017)
یزد، یزد، ۱۳۹۳- ۱۳۹۲ Yazd, Yazd, 2013-2014	تاریخ برداشت Harvesting date	Tabatabaei et al. (2017)
محال و بختیاری، شهر کرد، ۱۳۹۳چهار Chahar Mahal and Bakhtiari, Shahrekord, 2014	اسید هومیک Humic acid	Tadayon & Zafarian, (2016)
شیراز، باجگاه، ۱۳۸۸- ۱۳۸۷ Shiraz, Bajgah, 2008-2009	روش‌های کاشت، مقادیر بذر Planting methods, seed quantities	Yazdani et al. (2015)
البرز، کرج، ۱۳۷۶- ۱۳۷۵ Karaj, Alborz, 1996-1997	ژنوتیپ Genotype	Zamanian, (2003)
تهران، ورامین، ۱۳۹۴ Tehran, Varamin, 2015	منابع کود Fertilizer sources	Naderi, (2017)
خوزستان، اهواز، ۱۳۹۱- ۱۳۹۰ Khuzestan, Ahvaz, 2011-2012	آبیاری Irrigation	Behnam Far et al. (2015)
قم، قمرود، ۱۳۸۰- ۱۳۷۷ Qom, Qomrud, 1998-2001	ژنوتیپ Genotype	Zamanian et al. (2004)
	آزمایش‌های مورد استفاده در بخش ارزیابی مدل Experiments used for model evaluation	
اصفهان، نجف‌آباد، ۱۳۹۰- ۱۳۸۹ Isfahan, Najaf Abad, 2010-2011	تنش شوری، ژنوتیپ Salt stress, genotype	Ashrafi et al. (2015)
مرکزی، اراک، ۱۳۹۳- ۱۳۹۲ Markazi, Arak, 2013-2014	کودهای شیمیایی و بیولوژیکی Chemical and biological fertilizers	Madani et al. (2015)
همدان، بهار، ۱۳۹۱-۱۳۹۰ Hamadan, Bahar, 2011-2012	اثر چین Cutting effect	Majnuni et al. (2013)
کرمان، جیرفت، ۱۳۸۵- ۱۳۸۴ Kerman, Jiroft, 2005-2006	آبیاری Irrigation	Sadat Asilan & Hajiluei, (2010)
خوزستان، اهواز، ۱۳۸۸- ۱۳۸۷ Khuzestan, Ahvaz, 2008-2009	ژنوتیپ Genotype	Seyyed Mohammadi et al. (2011)
قم، قمرود، ۱۳۸۷- ۱۳۸۵ Qom, Qomrud, 2006-2008	شوری Salinity	Tabandeh, (2014)
اردبیل، مغان، ۱۳۹۲ Ardabil, Moqan, 2013	کانوپی، قدرت بذر Canopy, seed power	Soleyman Zadeh et al. (2015)
زنجان، خیرآباد، ۱۳۸۵- ۱۳۸۳ Zanjan, Kheyr Abad, 2004-2006	کشت مخلوط جو و یونجه Alfalfa and barley intercropping	Taherion et al. (2013)
بلوچستان، ایرانشهر، ۱۳۸۶- ۱۳۸۴ Baluchestan, Iranshahr, 2005-2007	روش کشت، میزان بذر Cropping method, seed rate	Miri, (2014)
تهران، هشتگرد، ۱۳۹۳ Tehran, Hashtgerd, 2014	قابلیت تولید Product capability	Nush Abadi et al. (2017)

جدول ٤- آزمایش‌های مورد استفاده برای ارزیابی نیاز آبی مدل SSM-iCrop2

Table 4- Experiments used for evaluation of the water requirement of SSM-iCrop2

لیست نقاط مقایسه نیاز آبی ارزیابی شده از NETWAT با SSM-iCrop2 List of points to compare evaluated water requirement from NETWAT with SSM-iCrop2		
اردبیل، اردبیل Ardebil, Ardebil	همدان، بهار همدان Hamadan, Bahar Hamadan	لرستان، الیگودرز Lorestan, Aligudarz
اردیبل، گرمی Ardebil, Germi	کرمان، لاله زار Kerman, Lalehzar	مرکزی، کمیجان Markazi, Komijan
اردبیل، مغان Ardebil, Moqan	کرمان، زرند Kerman, Zarand	مرکزی، غرق آباد Markazi, Qarqabad
چهارمحال و بختیاری، بروجن Chahar Mahal and Bakhtiari, Borujen	کرمان، بم Kerman, Bam	قم، قم Qom, Qom
چهارمحال و بختیاری، شهرکرد Chahar Mahal and Bakhtiari, Shahrekord	کرمان، میانده جیرفت Kerman, Miandeh jiroft	سمنان، گرمسار Semnan, Garmsar
آذربایجان شرقی، بستان آباد East Azarbaijan, Bostanabad	کرمانشاه، سنقر Kermanshah, Sonqor	آذربایجان غربی، میاندوآب West Azarbaijan, Miandoab
آذربایجان شرقی، میانه East Azarbaijan, Mianeh	خراسان رضوی، قوچان Razavi Khorasan, Quchan	آذربایجان غربی، خوی West Azarbaijan, Khoy
آذربایجان شرقی، تبریز East Azarbaijan, Tabriz	خراسان رضوی، سبزوار Razavi Khorasan, Sabzevar	آذربایجان غربی، سلماس West Azarbaijan, Salmas
اصفهان، خوانسار Isfahan, Khansar	کهکیلویه و بویر احمد، یاسوج Kohgiloyeh and Boyer Ahmad, Yasuj	آذربایجان غربی، ارومیه West Azarbaijan, Oroumyeh
فارس، اقلید فارس Fars, Eqlide fars	کردستان، بیجار Kordestan, Bijar	آذربایجان غربی، ماه‌نشان West Azarbaijan, Mah neshan
فارس، زرقان Fars, Zarqan	کردستان، سقز Kordestan, Saqez	آذربایجان غربی، خدابنده West Azarbaijan, Khoda bandeh
همدان، نهاوند Hamadan, Nahavand	لرستان، بروجرد Lorestan, Broujerd	

پارامترهای برآورد شده برای مدل در جدول (۵) نشـان داده شـده است. دامنه مقدار تعداد چین‌ها در پارامتریابی بین دو تـا هشـت چـین بسته به نوع آزمایش صورت گرفته در آن منطقه مورد نظر متغیر بـود. برای پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 مقادیر عملکـرد علوفـه یونجـه شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده مقایسه گردید. بدین منظـور از مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشی استفاده شد (جدول ۲). نتـایج نشـان داد که دامنه مقادیر عملکرد علوفه تک چین مشاهده شده بین ۱۱۱ تا ۵۴۶ گرم در مترمربع با میانگین ۳۲۳ گرم در مترمربع و دامنه مقـادیر عملکرد علوفه تک چین شبیه‌سازی شـده بـین ۱۷۵ تـا ۴۷۱ گـرم در مترمربع با میانگین ۲۸۰ گرم در مترمربع به‌دست آمد. همچنین دامنـه مقادیر مجموع عملکرد علوفه سالانه مشاهده شده بین ۷۳۰ تـا ۳۲۹۲ گرم در مترمربع با میانگین ۱۶۷۶ گـرم در مترمربـع و دامنـه مقـادیر مجموع عملکرد علوفه سالانه شبیه‌سازی شده بین ۸۲۰ تا ۲۵۹۵ گرم در مترمربع با میانگین ۱۳۹۲ گرم در مترمربع محاسبه شد. در نهایت، ۸۰ نقطه برای عملکرد علوفه تک چین با جذر میانگین مربعـات خطـا (RMSE) برابر با ۱۰۲/۵ گـرم در مترمربـع و ضـریب همبسـتگی (r) ۰/۶۲ (شکل ۱-a) و تعـداد ۳۵ نقطـه بـرای عملکـرد علوفـه سـالانه یونجه با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابـر بـا ۳۹۵ گـرم در مترمربع و ضریب همبستگی (r) ۰/۹۰ بـه‌دسـت آمـد (شـکل ۱- b). نتایج نشان داد که نزدیک به نیمی از نقاط در عملکرد علوفـه یونجـه تک چین و بیشتر نقاط در عملکرد علوفه سالانه در محـدوده خطـوط ۲۰± از خط ۱:۱ قرار گرفـت کـه ایـن امـر بیـانگر تخمـین خـوبی از پارامترهای مدل می‌باشد.



شکل ۱- نتایج مربوط به عملکرد علوفه تک چین مشاهده شده در مقابل عملکرد علوفه تک چین شبیه‌سازی شده (a)، و مجموع عملکرد علوفه سالانه مشاهده شده در مقابل مجموع عملکرد علوفه سالانه شبیه‌سازی شده (b) (با رطوبت صفر درصد) توسط مدل SSM-iCrop2 بر اساس داده‌های استفاده شده در بخش پارامتریابی

Fig. 1- Observed versus Simulated single-cut forage yield (a), Observed versus Simulated total annual forage yield (b) (0% mc) by SSM-iCrop2 model based on data used in model parameterization

نقطه‌چین نشان‌دهنده حدود اطمینان ۲۰ درصد و خط پر نشان‌دهنده خط ۱:۱ است.

The ±20% discrepancy lines are indicated by dashed lines. The solid line is 1:1 line.

جدول ۵- پارامترهای برآورد شده در مدل SSM-iCrop2 برای محصول یونجه در ایران

Table 5- SSM-iCrop2 parameter estimates for alfalfa in Iran

پارامتر (واحد) **Parameter (Unit)**	مخفف **Abv**	مقدار **Value**	منبع **References**
فنولوژی Phenology			
دمای پایه برای نمو Base temperature for development (°C)	TBD	5	جدول ۳ Table 3
دمای مطلوب تحتانی برای نمو Lower optimum temperature for development (°C)	TP1D	30	جدول ۳ Table 3
دمای مطلوب فوقانی برای نمو Upper optimum temperature for development (°C)	TP2D	30	جدول ۳ Table 3
دمای سقف برای نمو Ceiling temperature for development (°C)	TCD	40	جدول ۳ Table 3
واحد دمایی از ۱ ژانویه برای رشد مجدد بهاره یا بازشدن جوانه درختان Temperature unit from 1st January to bud burst or spring regrowth (°C)	ForReq	180	*
واحد دمایی برای جوانه‌زنی یا شروع رشد برگ Temperature unit for emergence or beginning leaf growth (°C)	tuEMR	6.5	*
واحد دمایی برای شروع رشد بذر یا میوه Temperature unit for beginning of seed or fruit growth (°C)	tuBSG	7.15	*
واحد دمایی برای پایان رشد بذر یا میوه Temperature unit for termination of seed or fruit growth (°C)	tuTSG	643.5	*
واحد دمایی برای بلوغ فیزیولوژیکی (پایان تجمع ماده خشک) Temperature unit for physiological maturity (end of dry mass accumulation) (°C)	tuPM	643.5	*

واحد دمایی برای برداشت یا ریزش برگ Temperature unit for harvest or leaf fall (°C)	tuHAR	650	*
توسعه سطح برگ و پیری Leaf area development and senescence			
نقطه ۱ شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نسبی یا نرمالیزه شده** Point #1 Relative leaf area index versus relative or normalized development stage**	x1, y1	(0.15, 0.01)	*
نقطه ۲ شاخص سطح برگ نسبی در مقابل مرحله نمو نسبی یا نرمالیزه شده** Point #2 Relative leaf area index versus relative or normalized development stage**	x2, y2	(0.8, 0.95)	*
حداکثر شاخص سطح برگ قابل‌انتظار Maximum expected leaf area index	LAIMX	3-5	*
واحد دمایی از کاشت تا شروع پیر شدن برگ‌ها Thermal unit from planting to the beginning of leaf aging (°C)	tuBLS	643.5	جدول ۳ Table 3
ضریب سرعت پیر شدن برگ Leaf senescence rate coefficient	SRATE	0	*
آستانه انجماد برای مرگ برگ / دمای پایین Low temperature / freezing threshold for leaf death (°C)	FrzTh	-7	*
مرگ نسبی برگ به‌ازای هر درجه کاهش دما زیر دمای پایین/ آستانه انجماد Relative leaf death per each degree below low temperature / freezing threshold	FrzLDR	0.01	*
دمای آستانه گرما برای پیرشدن برگ‌ها Heat threshold temperature for leaf senescence (°C)	HeatTH	35	*
افزایش نسبی سرعت پیری برگ به‌ازای هر درجه افزایش دما از دمای استانه گرما Relative increase in leaf senescence rate per each degree above heat threshold	HtLDR	0.1	*
تجمع ماده خشک Dry mass accumulation			
دمای پایه برای تولید ماده خشک Base temperature for dry matter production (°C)	TBRUE	0	*
دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک Lower optimum temperature for dry matter production (°C)	TP1RUE	8	*
دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک Upper optimum temperature for dry matter production (°C)	TP2RUE	25	*
دمای سقف برای تولید ماده خشک Ceiling temperature for dry matter production (°C)	TCRUE	40	*
ضریب خاموشی برای تشعشع فعال فتوسنتزی Extinction coefficient for photosyntheticaly active radiation	KPAR	0.65	جدول ۳ Table 3
کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد Radiation use efficiency under optimal growth conditions ($g.MJ^{-1}$)	RUE	2.3	جدول ۳ Table 3
ضریب پاسخ RUE به غلظت CO_2 Coefficient for response of RUE to CO2 concentration	C3C4	0.8	Soltani et al. (2020)
تشکیل عملکرد Yield formation			
حداکثر شاخص برداشت Maximum harvest index	HImax	0.9	جدول ۳ Table 3
کسری از توده خشک قابل جابجایی از بافت رویشی به بذر / میوه در حال رشد Fraction of dry mass remobilizable from the vegetative tissue to the developing seeds/fruits ($g.g^{-1}$)	FRTRL	0.05	*
ضریب تبدیل دانه Grain conversion coefficient ($g.g^{-1}$)	GCC	1	Soltani et al. (2020)
روابط آب Water relations			
واحد دمایی برای شروع رشد ریشه Temperature unit for beginning root growth (°C)	tuBRG	6.5	*
واحد دمایی برای پایان رشد ریشه Temperature unit for termination root growth (°C)	tuTRG	643.5	*

عمق ریشه در زمان سبز شدن Initial depth of roots at emergence or beginning leaf growth (mm)	iDEPORT	1000	*
حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک توسط ریشه Maximum effective depth of water extraction from soil (mm)	MEED	1300	*
ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient	TEC	5	*
کسر آب قابل دسترس خاک که در کمتر از آن تولید ماده خشک کم می‌شود FTSW threshold when dry matter production starts to decline	WSSG	0.5	*
کسر آب قابل دسترس خاک که در کمتر از آن گسترش سطح برگ کم می‌شود FTSW threshold when leaf area development starts to decline	WSSL	0.5	*
ضریب حساسیت نمو و پیر شدن به تنش خشکی Developmental susceptibility coefficient and aging to drought stress	WSSD	0	*

* مقادیر از مقالات منتخب استخراج و در پارامتریابی مدل استفاده شد و در جدول قرار گرفت.

* Values were extracted from selected articles and used in model parameterization and tabulated.

** به‌عنوان حداکثر سطح برگ گیاه در شرایط مطلوب (PLAMX: ۵۷۱ سانتی مترمربع در هر بوته) با تراکم گیاه (۷۰ گیاه در مترمربع برای شرایط آبیاری) استفاده می‌شود.

** Used as maximum plant leaf area under optimal condition (PLAMX: 571 cm^2 per plant) product by plant density (70 plants per m^2 for irrigated conditions)

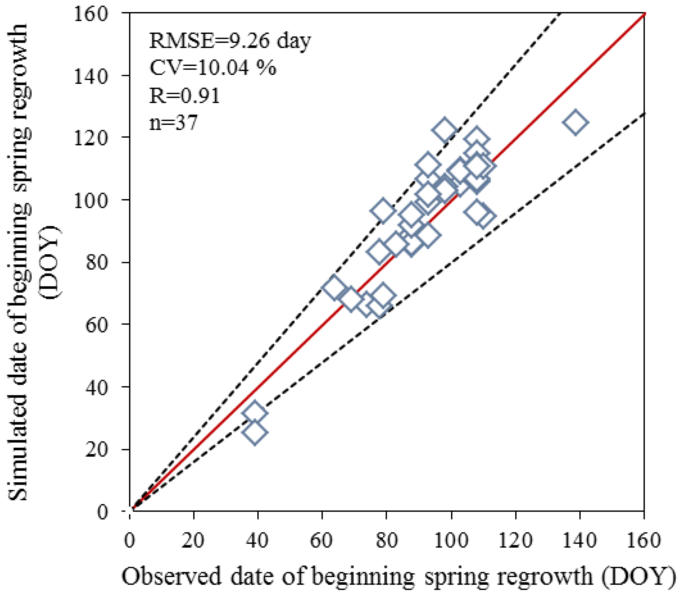
تعداد پارامترها در مدل SSM-iCrop2 خیلی کمتر از مدل‌های DSSAT (Hoogenboom et al., 2019) و APSIM (Hammer et al., 2010) می‌باشد، ولی با تعداد پارامترهای در مدل CropSyst (Stöckle et al., 2003) قابل قیاس است. اخیراً مدلی به‌نام SIMPLE توسط تیمی از مدل‌سازان DSSAT، APSIM و CropSyst تهیه شده است که فقط به ۱۳ پارامتر نیاز دارد (Zhao et al., 2019). مدل SIMPLE رسد و عملکرد گیاهان زراعی را در شرایط پتانسیل و آب محدود شبیه‌سازی می‌کند، ولی این مدل برای گیاهان زراعی پارامتریابی و ارزیابی شده است و گیاهان چندساله و درختان میوه را پوشش نمی‌دهد.

در پژوهشی مدل‌های DSSAT، APSIM، CropSyst و SSM برای گندم مورد استفاده و مقایسه شد، نتایج نشان داد که بین تعداد پارامتر در مدل برای فرآیندهای مختلف و کارکرد مدل ارتباط معنی‌داری وجود ندارد (Soltani & Sinclair, 2015). باید توجه داشت که کم بودن تعداد پارامتر دارای دو جنبه است: گاهی یک مدل در مقایسه با دیگری پارامتر کمتری دارد و تعداد فرآیند و واکنش کمتری را هم شبیه‌سازی می‌کند، امّا گاهی برای شبیه‌سازی فرآیند معینی (مثل تولید ماده خشک)، دو مدل دارای تعداد پارامتر متفاوت هستند، که در اینجا منظور این جنبه اخیر است (Soltani, 2009).

آزمون مدل با استفاده از داده‌های مستقل نشان داد که مدل SSM-iCrop2 در مجموع موفق بوده است؛ و نتایج ارزیابی مدل در ادامه ارائه می‌شود. کارکرد مدل برای پیش‌بینی تاریخ شروع رشد مجدد بهاره در یونجه برآورد شد. جهت بررسی میزان دقت این تاریخ، تاریخ‌های شروع رشد مجدد بهاره مشاهده شده در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب تغییرات (CV) تاریخ مذکور برابر با ۱۰ درصد و ضریب همبستگی (r) برابر ۰/۹۱ و میانگین مربعات خطا (RMSE) نه روز به‌دست آمد که حاکی از دقت بالای تخمین تاریخ شروع مجدد بهاره می‌باشد (شکل ۲).

نتایج ارزیابی مربوط به نیاز آبی یونجه بر اساس داده‌های موجود در برنامه NETWAT (که این داده‌ها هم به‌صورت برآورد می‌باشد) برای مقایسه با نتایج حاصل از مدل انجام گرفت و نتایج نشان داد که دامنه نیاز آبی یونجه در برنامه NETWAT بین ۵۱۴۰ تا ۱۲۶۹۰ با میانگین ۸۷۴۶ مترمکعب در هکتار و دامنه مقادیر نیاز آبی یونجه شبیه‌سازی شده بین ۴۰۹۳ تا ۱۶۸۷۴ با میانگین ۱۰۹۴۰ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد و نتایج با میانگین مربعات خطا (RMSE)، ۳۵۰۳ مترمکعب در هکتار، ضریب تغییرات برابر ۴۰ درصد و مقدار ضریب همبستگی ۰/۴۳ به‌دست آمد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تقریباً نیمی از نقاط در محدوده خط ۲۰± قرار دارد. از آنجایی که برنامه NETWAT نیز مدل می‌باشد، لزوماً از شکل مذکور نمی‌توان نتیجه‌گیری دقیقی برای قابل قبول بودن نتایج حاصل از مدل SSM-iCrop2 داشت، امّا مدل استفاده شده در پژوهش حاضر قادر به پیش‌بینی میزان آب آبیاری محصولات می‌باشد که برنامه NETWAT این قابلیت را ندارد. همچنین می‌توان خاطر نشان کرد

برای ارزیابی واقعی، مطلوب و نتیجه‌گیری درست میزان نیاز آبی شبیه‌سازی شده باید از داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده شود و از آنجایی که دسترسی به این برنامه (NETWAT) آسان‌تر بود، از نتایج آن برای مقایسه با نتایج مدل استفاده شد.



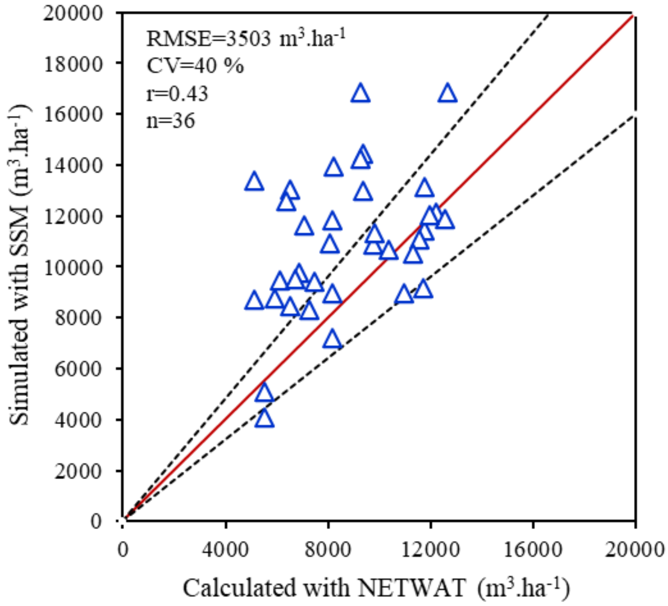
شکل ۲- تاریخ شروع رشد مجدد مشاهده شده در مقابل تاریخ شروع رشد مجدد شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop2 در ایران. شروع پس از تجمع ۱۸۰ درجه-روز-رشد از اول ژانویه

Fig. 2- Observed versus Simulated date of beginning spring regrowth of alfalfa in Iran. Starting after accumulation 180 GDD since 1st of January

نقطه‌چین نشان‌دهنده حدود اطمینان ۲۰ درصد و خط پر نشان‌دهنده خط ۱:۱ است.

The ±20% confidence level is indicated by dashed lines and the Solid line is1:1line.

دامنه مقدار تعداد چین‌ها در ارزیابی بین ۱ تا ۱۰ چین بسته به نوع آزمایش صورت گرفته در آن منطقه مورد نظر متغیر بود. همانند قسمت پارامتریابی، ارزیابی عملکرد علوفه یونجه هم برای عملکرد تک چین‌های علوفه یونجه و هم مجموع سالانه محاسبه شد و نتایج ارزیابی برای صفت عملکرد علوفه نشان داد که دامنه مقادیر عملکرد علوفه تک چین مشاهده شده بین ۱۱۲ تا ۶۴۰ گرم در مترمربع با میانگین ۳۳۰ گرم در مترمربع و دامنه مقادیر عملکرد علوفه تک چین شبیه‌سازی شده بین ۱۸۹ تا ۴۵۷ گرم در مترمربع با میانگین ۳۵۱ گرم در مترمربع به‌دست آمد. همچنین دامنه مقادیر مجموع عملکرد علوفه سالانه مشاهده شده بین ۶۴۶ تا ۴۰۴۲ گرم در مترمربع با میانگین ۱۷۱۷ گرم در مترمربع و دامنه مقادیر مجموع عملکرد علوفه سالانه شبیه‌سازی شده بین ۶۹۳ تا ۳۲۹۶ گرم در مترمربع با میانگین ۱۶۵۴ گرم در مترمربع محاسبه شد. در نهایت، ۳۱ نقطه برای عملکرد علوفه تک چین با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۸۸/۳ گرم در مترمربع و ضریب همبستگی (r) ۰/۷۹ (شکل ۴-a) و تعداد ۲۱ نقطه برای عملکرد علوفه سالانه یونجه با جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۳۴۴/۴ گرم در مترمربع و ضریب همبستگی (r) ۰/۹۰ به‌دست آمد (شکل ۴-b). نتایج نشان داد که نزدیک به نیمی از نقاط در عملکرد علوفه یونجه تک چین و اکثر نقاط در عملکرد علوفه سالانه در محدوده خطوط ۲۰± از خط ۱:۱ قرار گرفت که این مقادیر نشان‌دهنده دقت خوب مدل در تخمین عملکرد علوفه یونجه در استان‌های مهم تولیدکننده این محصول می‌باشد که می‌توان از این مدل برای مقاصد مختلف نیز استفاده نمود.

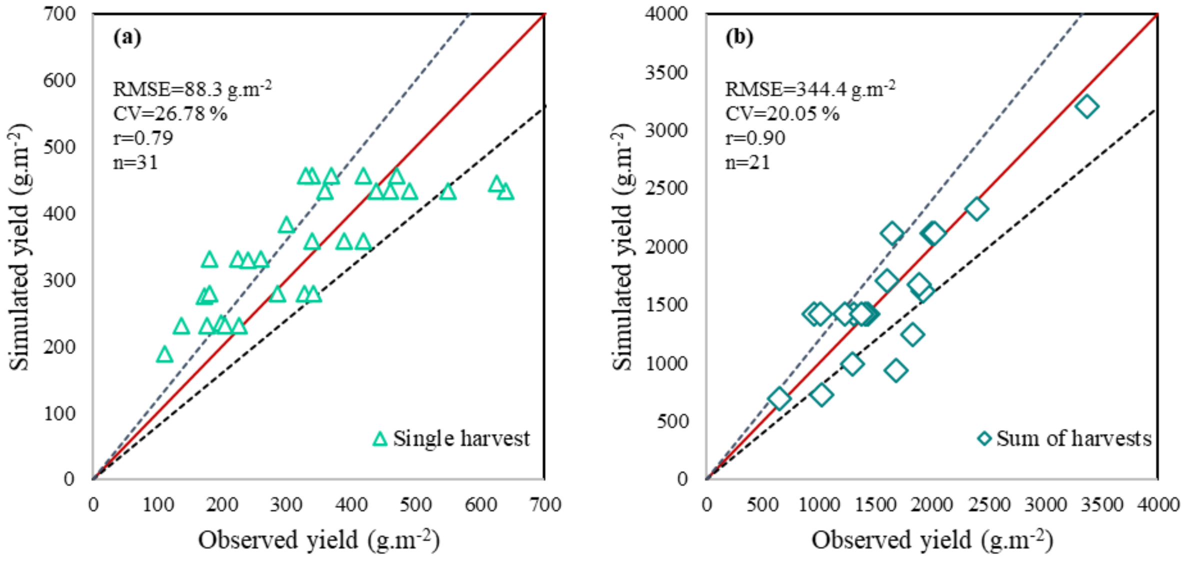


شکل ۳- نیاز آبی محاسبه‌شده با NETWAT در مقابل نیاز آبی شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop2 در چندین مکان مختلف ایران

Fig. 3- Calculated with NETWAT versus Simulated irrigation water by SSM model in several locations in Iran

حدود اطمینان ۲۰ درصد با خطوط نقطه چین و خط ۱:۱ با خط توپر مشخص شده است.

The ±20% confidence level is indicated by dashed lines. The solid line is 1:1 line.



شکل ٤- نتایج مربوط به عملکرد علوفه تک چین مشاهده شده در مقابل عملکرد علوفه تک چین شبیه‌سازی شده (a)، و مجموع عملکرد علوفه سالانه مشاهده شده در مقابل مجموع عملکرد علوفه سالانه شبیه‌سازی شده (b) (با رطوبت صفر درصد) توسط مدل SSM-iCrop2 بر اساس داده‌های استفاده شده در بخش ارزیابی

Fig. 4- Observed versus Simulated single-cut forage yield (a), Observed versus Simulated total annual forage yield (b) (0% mc) by SSM-iCrop2 model based on data used in model evaluation

نقطه‌چین نشان‌دهنده حدود اطمینان ۲۰ درصد و خط پر نشان‌دهنده خط ۱:۱ است.

The dotted line represents the 20% confidence level, and the solid line represents the 1: 1 line.

چندین مطالعه در خصوص پارامتریابی و ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهان با استفاده از مدل SSM-iCrop2 صورت گرفته است. در پژوهشی پارامتریابی و ارزیابی ۳۲ گونه محصول (محصولات زراعی، سبزیجات، درختان میوه و ازجمله محصول یونجه) در کل ایران با استفاده از مدل مذکور انجام گرفت و نتایج ارزیابی برای محصول یونجه در ۲۹ ایستگاه کشور، مقدار RMSE، CV و r به‌ترتیب برابر با ۱۰/۴ روز، ۱۱/۱ درصد و ۰/۹۱ را پیش‌بینی شد و در نتایج ارزیابی مدل برای سایر محصولات نیز دقت قابل قبولی از شبیه‌سازی عملکرد و مراحل فنولوژیک را گزارش شده است (Soltani et al., 2020). همچنین در تحقیق صورت گرفته دیگری بر روی ارزیابی و پارامتریابی محصول سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L.*) در کشور با استفاده از مدل مذکور، نتایج قابل قبولی برای مقادیر شاخص‌های آماری در هر دو مرحله پارامتریابی و ارزیابی (RMSE، CV و r) به‌دست آمد و گزارش شد که می‌توان از این مدل برای تخمین عملکرد بالقوه غده، شکاف عملکرد و اثرات تغییرات آب‌وهوایی استفاده کرد (Dadrasi et al., 2020). در پژوهش انجام شده در خصوص پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای گیاه ذرت در استان همدان، نتایج ارزیابی مدل دقت قابل قبولی از شبیه‌سازی عملکرد و مراحل فنولوژیک را نشان داد (Dadrasi & Torabi, 2017).

پژوهشی به‌منظور تخمین پارامترهای مدل SSM-iCrop (پارامترهای مربوط به مراحل فنولوژی، گسترش و پیر شدن سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب) و ارزیابی کارایی آن در پیش‌بینی رشدونمو گیاه باقلا (*Vicia faba L.*) در شرایط آب‌وهوایی گرگان انجام شد. مدل نتایج قابل قبولی را برای روز تا گل‌دهی (۳/۸ =RMSE روز و ۴/۱٪ =CV)، روز تا رسیدگی (RMSE=۱۱/۹ روز و ۸/۱٪ =CV)، عملکرد بیولوژیک (RMSE=۱۵۸/۵ گرم در مترمربع و ۲۱/۶٪ =CV) و عملکرد دانه (RMSE=۱۱۸/۶ گرم در مترمربع و ۲۴/۷٪ =CV) را پیش‌بینی کرد و بیان شد که می‌توان از این مدل برای بررسی وضعیت مدیریت زراعی و تجزیه‌وتحلیل رشد و عملکرد باقلا در شرایط گرگان استفاده نمود (Torabi et al., 2020). در همین منطقه در تحقیق صورت گرفته به‌منظور شبیه‌سازی رشد، توسعه و عملکرد گندم در فصل‌های مختلف و با استفاده از مدل SSM (Soltani et al., 2013Soltani & Sinclair, 2012 ;) نشان داده شد که پارامترهای آماری قابل قبولی بین عملکردهای شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (r=۰/۶۷، RMSE=۳۰۸/۴ کیلوگرم بر هکتار) وجود داشت (Soltani & Sinclair, 2015). در ادامه در همین منطقه، پژوهش دیگری با استفاده از مدل SSM-iLegume به‌منظور پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا انجام گرفت و برای برآورد ضرایب و ارزیابی مدل از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مختلف استفاده شد و نتایج حاکی از کارایی قابل قبول آن برای جنبه‌های مهم زراعی در مقابل آزمایش‌های مشاهده شده شامل روز تا گل‌دهی (RMSE=۵/۸ روز و ۱۱٪ =CV)، روز تا رسیدگی (RMSE=۸/۷ روز و ۶٪ =CV) و عملکرد دانه (RMSE=۴۸ گرم در مترمربع و ۱۵٪ =CV) بود و نشان داده شد که این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد سویا و محدودیت‌های آن در واکنش به شرایط محیطی زیست‌محیطی، ورودی‌های مدیریتی و عوامل ژنتیکی استفاده شود (Nehbandani et al., 2015).

مدل SSM-iCrop2 در مطالعاتی شبیه‌سازی عملکرد و نیاز آبی محصولات متنوع، قابل اجراست. این مدل با موفقیت در یک پروژه امنیت غذایی جهانی (GYGA) استفاده شده و برای تهیه عملکرد پتانسیل چندین محصول زراعی مانند گندم، جو، برنج (*Oryza sativa* L.)، نخود، ذرت، لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.)، سویا، پنبه (*Gossypium hirsutum* L.)، کلزا (*Brassica napus* L.)، سیب‌زمینی و چغندرقند (*Beta vulgaris* L.)در شرایط آبیاری و دیم استفاده شد (Soltani et al., 2020).

نتیجه‌گیری

در بسیاری از موارد، به داده‌های زیادی جهت پارامتریابی و ارزیابی فرآیندهای مختلف شبیه‌سازی شده توسط مدل نیاز است، به‌علاوه تمامی خروجی‌های مدل نمی‌توانند تحت ارزیابی مدل قرار گیرند؛ زیرا اندازه‌گیری دقیق بعضی از پارامترها یا خیلی سخت است و یا اصلاً ممکن نیست؛ بنابراین، در مدل‌هایی مانند مدل SSM-iCrop2 که برای سطح کشور پارامتریابی و ارزیابی شده است، اولین اصل، ساده‌سازی مدل و در عین حال افزایش دقت برآورد عملکرد است که در تحقیق حاضر بدان توجه ویژه‌ای شده است. نتایج به‌دست آمده از پارامتریابی عملکرد علوفه تک چین (RMSE= ۱۰۲/۵ گرم در مترمربع و r=۰/۶۲) و مجموع عملکرد علوفه سالانه یونجه (۳۹۵

RMSE= گرم در مترمربع و r=۰/۹۰)، ارزیابی نیاز آبی یونجه (۳۵۰۳ RMSE= مترمکعب در هکتار و r=۰/۴۳)، ارزیابی تاریخ شروع رشد مجدد بهاره (RMSE= ۹/۲۶ روز و r=۰/۹۱) و عملکرد علوفه تک چین (RMSE= ۸۸/۳ گرم در مترمربع و r=۰/۷۹) و مجموع عملکرد علوفه سالانه یونجه (RMSE= ۳۴۴/۴ گرم در مترمربع و r=۰/۹۰) حاصل از مدل SSM-iCrop2 نشان می‌دهد که مدل مذکور پیش‌بینی معقول و برآورد صحیح پارامترهای مدل از عملکرد و نیاز آبی برای محصول یونجه در ایران را ارائه می‌دهد؛ بنابراین، از این مدل می‌توان برای پیش‌بینی عملکرد محصول یونجه در آب‌وهوا و مناطق متفاوت و تحت شرایط مدیریتی مختلف استفاده نمود.

References

Agricultural Statistics. (2020). Tehran: Ministry of Agricultural Jihad, Deputy Minister of Planning and Economics, Information and Communication Technology Center. Available at web site https://www.maj.ir/. (verified 10 Oct 2020). (In Persian)

Aliahmadi, N., Hashmitabar, M., & Hoseini, S.M. (2021). Assessment of the effect of climate change on the production of horticultural products with a randomized production approach, Case study: Date product. *Agricultural Economics Research*, *12*, 56-82. (In Persian with English Summary)

Dadrasi, A., & Torabi, B. (2017). Predict the growth and yield of corn in Hamedan. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *4*, 595-610. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22059/IJFCS.2017.132723.653951

Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of a Simple Simulation Model (SSM-iCrop2) for potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield in Iran. *Potato Research*, *63*, 545-563. https://doi.org/10.1007/s11540-020-09456-y

Ghaderpour, O., Rafiee, S., Sharifi, M., & Mousavi-Avval, S.H. (2018). Quantifying the environmental impacts of alfalfa production in different farming systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *27*, 109-118. https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.04.002

Hammer, G. L., Sinclair, T. R., Boote, K. J., Wright, G. C., Meinke, H., & Bell, M.J. (1995). A peanut simulation model: I. Model development and testing. *Agronomy Journal*, *87*, 1085-1093. https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700060009x

Hammer, G.L., Van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S.C., Broad, I., Harland, P., & Muchow, R.C. (2010). Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany*, *61*, 2185-2202. https://doi.org/10.1093/jxb/erq095

Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L. P., & Jones, J.W. (2019). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5 Available at Web site https://DSSAT.net. DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., & Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, *18*, 235-265. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7

Koo, J., & Dimes, J. (2013). HC27 Generic Soil Profile Database. In: Harvard Dataverse, V5. International Food Policy Research Institute, Washington, DC. https://doi.org/10.7910/DVN/90WJ9W

McCown, R.L., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Holzworth, D.P., & Freebairn, D.M. (1996). APSIM: A novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, *50*, 255-271. https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V

Moniri Far, H., Moradian, P., Ahmadi, R., & Moghaddam, A. (2020). Identification of suitable alfalfa cultivars for deficit irrigation conditions in Tabriz Plain. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *30*, 249-264. (In Persian with English Summary)

Monirifar, H., Roudsari, A.M., Ghassemi, S., & Tavasolee, A. (2020). Harvest time and cultivar effects on growth, physiological traits, yield and quality of alfalfa in saline condition. *International Journal of Plant Production*, *14*, 453-462. https://doi.org/10.1007/s42106-020-00096-3

Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., & Rajabi, R. (2015). Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research, 22*, 1-26. (In Persian with English Summary)

Priestley, C.H.B., & TAYLOR, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review, 100*, 81-92. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2

Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C. & Bowen, W. T. (1998). In: G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P.K. Thornton (Eds.) Cereal growth, development and yield. Understanding options for agricultural production. Springer, Dordrecht. p. 79-98. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_5

Sinclair, T.R. (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. *Field Crops Research*, *15*, 125-141. https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90082-1

Sinclair, T.R., & Amir, J. (1992). A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat. *Field Crops Research*, *30*, 63-78. https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90057-G

Sinclair, T.R., & Muchow, R.C. (1995). Effect of nitrogen supply on maize yield: I. Modeling physiological responses. *Agronomy Journal*, *87*, 632-641. https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700040005x

Sinclair, T. R., Muchow, R. C., & Monteith, J. L. (1997). Model analysis of sorghum response to nitrogen in subtropical and tropical environments. *Agronomy Journal*, *89*, 201-207. https://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900020009x

Soltani, A., Ghassemi-Golezani, K., Khooie, F.R., & Moghaddam, M. (1999). A simple model for chickpea growth and yield. *Field Crops Research*, *62*, 213-224. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00017-9

Soltani, A., Robertson, M. J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M., & Sarparast, R. (2006). Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology*, *138*, 156-167. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021

Soltani, A., & Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, *10*, 198-207. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.06.003

Soltani, A. (2009). Mathematical modeling in field crops. JDM Press, Mashhad, Iran. (In Persian)

Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012). Modeling physiology of crop development, growth and yield. CABI Publisher, 312 p. https://doi.org/10.1079/9781845939700.0000

Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T.R. (2013). SSM-wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, *7*, 711-740. https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1266

Soltani, A., and Sinclair, T.R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, *175*, 37-46. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.019

Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O. Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., Van Ittersum, M.K., & Sinclair, T.R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, *182*, 102855. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855

Stöckle, C.O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, *18*, 289-307. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0

Tanner, C.B., & Sinclair, T.R. (1983). Efficient water use in crop production: Research or re-search? In: H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (Eds). Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. p. 1–27. https://doi.org/10.2134/1983.limitationstoefficientwateruse.c1

Torabi, B., Ebrahimi, N., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of SSM iCrop Model for prediction of growth and development of faba bean in climatic conditions of Gorgan. *Journal of Crops Improvement*, *22*, 531-542. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22059/jci.2020.273742.2148

Vatankhah, T., Moosavi, S. N., & Tabatabaei, S.M. (2020). The economic impacts of climate change on agriculture in Iran: A CGE model analysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *42*, 1935-1949. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604903

Wahbi, A., & Sinclair, T. R. (2005). Simulation analysis of relative yield advantage of barley and wheat in an eastern Mediterranean climate. *Field Crops Research*, *91*, 287-296. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.020

Zhao, C., Liu, B., Xiao, L., Hoogenboom, G., Boote, K.J., Kassie, B.T., Pavan, W., Shelia, V., Kim, K.S., Hernandez-Ochoa, I.M., & Wallach, D. (2019). A SIMPLE crop model. *European Journal of Agronomy*, *104*, 97-106. https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.009